

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/358854245>

Fundamentos del vuelo del Avión

Book · February 2022

CITATIONS

0

READS

5,080

1 author:



[Gustavo Krause](#)

National University of Cordoba, Argentina

33 PUBLICATIONS 195 CITATIONS

SEE PROFILE

Serie Ingeniería

Fundamentos del vuelo del Avión

Principios físicos y tecnológicos de la
operación aérea

Gustavo J. Krause



Aeronáutica

FUNDAMENTOS DEL VUELO DEL AVIÓN

Principios físicos y tecnológicos de la operación aérea



Fundamentos del vuelo del Avión

Gustavo J. Krause

Departamento Aeronáutica

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Universidad Nacional de Córdoba

Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología

CONICET

UNIVERSITAS

Editorial Científica Universitaria

Córdoba, Argentina

CRÉDITOS DE LA PRESENTE EDICIÓN:

Diseño de la carátula: EL AUTOR
Diagramación y diseño: EL AUTOR
Dibujos y gráficos: EL AUTOR
Título de la obra: FUNDAMENTOS DEL VUELO DEL AVIÓN
Autor: GUSTAVO J. KRAUSE (GUSTAVO.KRAUSE@UNC.EDU.AR)
Producción gráfica: UNIVERSITAS EDITORIAL

El cuidado de la presente edición estuvo a cargo de
El Autor y Universitas Editorial.

Gustavo J. Krause
Fundamentos del vuelo del Avión
1ra. edición – Córdoba. Universitas Editorial, 2022.
490 p. : 24,5 × 17 cm
ISBN: 978-987-4029-66-9



Pasaje España 1467, B° Nueva Córdoba (5000). Córdoba. Argentina.
Tel: +54 9 351 2587542– E-mail: contacto@universitaseditorial.com.ar

Miembros de la Cámara Argentina del Libro y Calipacer



CÁMARA ARGENTINA DEL LIBRO

1ra. edición (2022)

© (2022) GUSTAVO J. KRAUSE

© (2022) UNIVERSITAS EDITORIAL

ISBN 978-987-4029-66-9



Papel

ISBN 978-987-4029-67-6



Digital

Hecho el depósito que marca la Ley 11.723.

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad, ni parte de este libro, incluida la portada, puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico, ni mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin el permiso expreso del editor.

Impreso en Córdoba, Argentina, por UNIVERSITAS EDITORIAL, Pasaje España 1467, B° Nueva Córdoba (5000). Tel: +54 9 351 2587542, E-mail: contacto@universitaseditorial.com.ar, en febrero de 2022. PRINTED IN ARGENTINA.

Venta directa en Argentina y el exterior:

Universitas Editorial. Pasaje España 1467, B° Nueva Córdoba (5000).
Córdoba. Argentina. Tel: +54 9 351 2587542.
E-mail: contacto@universitaseditorial.com.ar

Índice general

Prefacio	XIII
Nomenclatura	XV
1. El avión como medio de transporte	1
1.1. Reseña histórica	2
1.1.1. “Prehistoria” de la aviación	2
1.1.2. Era de los aeróstatos	4
1.1.3. Comienzos de la aviación moderna	7
1.1.4. Nacimiento de la industria aeronáutica	17
1.2. Desarrollo del transporte aéreo	18
1.2.1. Período entre guerras	19
1.2.2. Período de posguerra	21
1.2.3. Era de los reactores	23
1.2.4. Situación actual del transporte aéreo	28
1.3. Guía de estudio	29
2. Fundamentos físicos	31
2.1. Propiedades del aire	31
2.1.1. Hipótesis del continuo	33
2.1.2. Ecuación de estado	34
2.1.3. Ecuación hidrostática	36
2.1.4. La atmósfera terrestre	39
2.1.5. Atmósfera estándar	40
2.1.6. El baroaltímetro	43
2.2. Fundamentos del flujo de aire	47
2.2.1. Conceptos iniciales	47
2.2.2. Ecuaciones de conservación	55
2.2.3. Determinación de la velocidad: El tubo Pitot	61
2.2.4. Efectos de compresibilidad	65
2.3. Flujo viscoso	71
2.3.1. Viscosidad	71
2.3.2. Condición de no deslizamiento	76
2.3.3. El número de Reynolds	77
2.3.4. Flujo laminar y flujo turbulento	78
2.4. Capa límite	82
2.4.1. Desarrollo de la capa límite	83
2.4.2. Capa límite laminar	84

2.4.3.	Capa límite turbulenta	86
2.4.4.	Separación de la capa límite	89
2.5.	Guía de estudio	92
3.	Fuerzas y coeficientes aerodinámicos	97
3.1.	Acciones aerodinámicas sobre un cuerpo	97
3.2.	Introducción al Análisis dimensional	100
3.2.1.	Principio de homogeneidad dimensional	102
3.2.2.	El Teorema Pi de Buckingham	102
3.3.	Coeficientes aerodinámicos	106
3.3.1.	Condiciones de similitud en Aerodinámica	109
3.4.	La fuerza de sustentación	111
3.4.1.	Distribución de presión	111
3.4.2.	El fundamento “circulatorio” de la sustentación	114
3.5.	La fuerza de resistencia aerodinámica	117
3.5.1.	Resistencia parásita	118
3.5.2.	Resistencia de fricción	120
3.5.3.	Resistencia de presión	122
3.5.4.	Características generales de la resistencia aerodinámica	125
3.5.5.	Resistencia de esferas y cilindros	132
3.5.6.	Definiciones de áreas equivalentes	133
3.6.	Guía de estudio	134
4.	Mediciones y experimentación en Aerodinámica	139
4.1.	Medición de presiones	139
4.1.1.	Sondas de presión	140
4.1.2.	Sonda Pitot	141
4.1.3.	Tomas de presión estática	145
4.1.4.	Sonda Pitot-estática	153
4.1.5.	Determinación de la dirección del flujo	156
4.2.	Indicadores de presión	157
4.2.1.	Manómetros de columna de líquido	158
4.2.2.	Transductores de presión	168
4.3.	Túneles de viento	171
4.3.1.	Túneles de viento subsónicos	172
4.3.2.	Configuración de los túneles de viento subsónicos	178
4.3.3.	Ensayos aerodinámicos en túneles de viento	181
4.3.4.	Consideraciones para el diseño de túneles de viento	186
4.3.5.	Túneles de viento de uso específico	189
4.4.	Guía de estudio	191
5.	Perfiles aerodinámicos	193
5.1.	Introducción	193
5.1.1.	Características geométricas de los perfiles	194
5.1.2.	Generación de sustentación en un perfil alar	195
5.1.3.	La circulación en los perfiles aerodinámicos	198
5.2.	Características aerodinámicas de los perfiles alares	199
5.2.1.	Sustentación	201
5.2.2.	Resistencia aerodinámica	204
5.2.3.	Momento de cabeceo	206

5.2.4.	Efectos de la geometría del perfil	213
5.2.5.	Efecto del número de Reynolds	216
5.3.	Distribución de presión en un perfil alar	217
5.3.1.	Determinación del coeficiente de sustentación en términos de C_p	218
5.4.	Efectos de compresibilidad en los perfiles alares	221
5.4.1.	Número de Mach crítico	222
5.4.2.	Divergencia de la resistencia aerodinámica	224
5.5.	Superficies móviles	226
5.5.1.	Momento de charnela	228
5.6.	Desarrollo y diseño de perfiles alares	230
5.6.1.	Etapas de sistematización: Perfiles NACA	233
5.6.2.	Etapas computacionales	241
5.7.	Guía de estudio	242
6.	Superficies sustentadoras	247
6.1.	Introducción	247
6.1.1.	Definiciones geométricas	249
6.1.2.	Consideraciones aerodinámicas de las alas	252
6.2.	Alas finitas	255
6.2.1.	Efectos del campo de movimiento tridimensional	256
6.2.2.	Sustentación en alas finitas	261
6.2.3.	Resistencia inducida	262
6.2.4.	Características aerodinámicas de las alas finitas	267
6.2.5.	Estrategias para reducir la resistencia inducida	270
6.3.	Efectos de compresibilidad en las alas finitas	272
6.3.1.	Influencia del ángulo de flecha	272
6.3.2.	Vuelo supersónico	274
6.4.	Dispositivos hipersustentadores	276
6.4.1.	<i>Flaps</i> de borde de fuga	278
6.4.2.	<i>Flaps</i> de borde de ataque	281
6.4.3.	Otros dispositivos hipersustentadores	284
6.4.4.	Frenos aerodinámicos	286
6.5.	Guía de estudio	287
7.	Componentes del avión	291
7.1.	Componentes básicos del avión	291
7.1.1.	Fuselaje	293
7.1.2.	Ala	297
7.1.3.	Empenaje	299
7.1.4.	Tren de aterrizaje	301
7.1.5.	Sistema propulsivo	304
7.2.	Instrumentos básicos del avión	313
7.2.1.	Clasificación de los instrumentos	313
7.2.2.	El altímetro	316
7.2.3.	El anemómetro	324
7.2.4.	El indicador de velocidad vertical	332
7.2.5.	Instrumentos giroscópicos	333
7.3.	Guía de estudio	338

8. Estabilidad y control del avión	343
8.1. Introducción	343
8.1.1. Definiciones para el estudio de la estabilidad y el control	344
8.2. Controles básicos	349
8.2.1. Control lateral	350
8.2.2. Control longitudinal	354
8.2.3. Control direccional	358
8.2.4. Efectos dinámicos en los controles básicos	362
8.3. Estabilidad del avión	363
8.3.1. Conceptos básicos de estabilidad	363
8.3.2. Estabilidad longitudinal	366
8.3.3. Modos dinámicos longitudinales	377
8.3.4. Estabilidad estática direccional	379
8.3.5. Estabilidad estática lateral	381
8.3.6. Modos dinámicos asimétricos	384
8.4. Guía de estudio	385
9. Actuaciones del avión	391
9.1. Ecuaciones de movimiento	391
9.1.1. Grados de libertad del problema	391
9.1.2. Sistemas de referencia	392
9.1.3. Ecuaciones de movimiento del vuelo simétrico	393
9.1.4. Características de las ecuaciones de movimiento	398
9.1.5. Movimiento en seis grados de libertad	399
9.2. <i>Performances</i> estacionarias	403
9.2.1. Condiciones de vuelo estacionario	403
9.2.2. Vuelo estacionario, recto y nivelado	404
9.2.3. Trepada estacionaria	417
9.2.4. Vuelo sin potencia	420
9.3. <i>Performances</i> de despegue y aterrizaje	422
9.3.1. Despegue	422
9.3.2. Aterrizaje	431
9.3.3. Efecto suelo	436
9.4. Vuelo acelerado	437
9.4.1. Giro nivelado	438
9.4.2. Las maniobras de <i>pull-up</i> y <i>pull-down</i>	441
9.4.3. El diagrama $V-n$	443
9.5. Guía de estudio	445
A. Unidades de medida	449
A.1. Conversión de unidades	449
A.2. Utilización de unidades en aeronáutica	451
B. Ecuaciones de la Atmósfera Estándar	453
C. Teoría de la línea sustentadora	455
C.1. Definiciones preliminares	455
C.2. Distribución de circulación en las alas finitas	457
D. Algunos acrónimos usados en aeronáutica	461

Bibliografía	463
Índice alfabético	467

Prefacio

El presente texto está concebido como material de apoyo para estudiantes y profesionales de la ingeniería que se inician en el ámbito de la Aeronáutica o que buscan reforzar sus conocimientos en la materia. Este libro surgió de la necesidad de cubrir de manera introductoria los aspectos más importantes que rigen el vuelo del avión, tanto desde el punto de vista físico como tecnológico, permitiendo así un abordaje integral del problema sin tener que recurrir a múltiples publicaciones específicas que pueden resultar complejas para quienes comienzan a estudiar esta disciplina. Si bien existen textos que plantean esta temática con un enfoque similar, éstos no suelen encontrarse en idioma español y, a mi juicio, a menudo carecen de la adecuada fundamentación física y matemática que requiere la formación de los futuros profesionales de la industria, el desarrollo y la investigación aeronáutica.

Los contenidos del presente texto son un resultado de la recopilación de material realizada durante los sucesivos dictados de la asignatura introductoria llamada *Aeronáutica General*, la cual forma parte de la currícula obligatoria de la carrera de Ingeniería Aeronáutica que se dicta en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. Teniendo en cuenta que los estudiantes de dicha asignatura cuentan con una buena base en Física y Matemática, la cual fue adquirida durante los años previos correspondientes al ciclo básico de la carrera, se asume que el lector tiene la capacidad de comprender los principios físicos y los desarrollos matemáticos planteados a lo largo del libro. Por otro lado, se resalta el carácter introductorio y orientativo de este material, recomendándose enfáticamente la profundización de los temas abordados a través de las referencias bibliográficas citadas en el texto. De hecho, se espera que este libro sirva como “plataforma de lanzamiento” hacia otros títulos más específicos que podrán ser estudiados con mayor facilidad a partir de los conocimientos adquiridos mediante los contenidos aquí propuestos.

El libro ha sido organizado en nueve capítulos en los cuales se disponen los temas referidos a la aerodinámica, el análisis experimental, la configuración, la operación y la física del vuelo de un avión convencional, además de una introducción al mundo de la aviación presentada en el Capítulo 1. Teniendo en cuenta que nuestro análisis requiere del conocimiento de los conceptos básicos de Aerodinámica, ya que en ellos se sustenta el principio del vuelo, en el Capítulo 2 se hace una presentación de los fundamentos referidos al tratamiento del flujo de aire y de sus propiedades, prestando especial atención a la modelación de la atmósfera terrestre, que es el medio por el cual se desplazan los aviones. Posteriormente, en el Capítulo 3, se definen las acciones aerodinámicas (fuerzas y momentos) que actúan sobre los cuerpos inmersos en una corriente de aire y se introducen los aspectos básicos del Análisis Dimensional, que es un elemento vital de la Aerodinámica aplicada que permite vincular los resultados obtenidos en el laboratorio con las acciones que experimenta el avión en las condiciones reales de vuelo. Los puntos más importantes de las mediciones y la experimentación en Aerodinámica se estudian en el Capítulo 4. A partir del Capítulo 5 se presentan los contenidos específicos correspondientes a los fundamentos del vuelo del avión, comenzando con el estudio de la aerodinámica de los perfiles alares para continuar luego, en

el Capítulo 6, con las características de las superficies sustentadoras. En el Capítulo 7 se describen los principales componentes e instrumentos del avión y se presentan algunas de las definiciones básicas para la operación aérea. Finalmente, en el Capítulo 8 se explican los conceptos elementales de la estabilidad y el control de un avión convencional y en el Capítulo 9 se muestran los fundamentos para el cálculo de las actuaciones básicas del avión.

Antes de finalizar esta presentación, me gustaría agradecer a los miembros del Departamento Aeronáutica y a la comunidad estudiantil de la carrera de Ingeniería Aeronáutica de la Universidad Nacional de Córdoba por su colaboración en el mejoramiento de estos contenidos. Por otra parte, espero que este material sirva de guía y ayude al desarrollo de las próximas generaciones de profesionales de la industria aeronáutica.

Gustavo J. Krause

Córdoba, febrero de 2022

Bibliografía

- Abbott, I. y von Doenhoff, A. (1959). *Theory of Wing Sections*. Dover Publications, New York, 2nd ed.
- Anderson, J. (1999). *Aircraft Performance and Design*. McGraw-Hill, New York, 1st ed.
- Anderson, J. (2001). *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill, New York, 3rd ed.
- Anderson, J. (2012). *Introduction to Flight*. McGraw Hill, New York, 7th ed.
- Barlow, J., Rae, W., y Pope, A. (1999). *Low-speed Wind Tunnels Testing*. John Wiley & Sons, New York, 3rd ed.
- Benedict, R. P. (1984). *Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow measurements*. John Wiley & Sons, New York, 3rd ed.
- Brandt, S., Stiles, R., Bertin, J., y Whitford, R. (2004). *Introduction to Aeronautics: A Design Perspective*. AIAA, Reston, Virginia, 1st ed.
- Carmona, J. A. I. (2000). *Aerodinámica y Actuaciones del Avión*. Editorial Paraninfo, Madrid, 10ma ed.
- Chue, S. H. (1975). "Pressure probes in fluid measurement". *Progress for Aerospace Science*, 16(2):147–223.
- Etkin, B. y Reid, L. (1996). *Dynamics of Flight: Stability and Control*. John Wiley & Sons, New York, third ed.
- Glauert, H. (1948). *The Elements of Aerofoils and Airscrew Theory*. Cambridge University Press, London, second ed.
- Gorlin, S. M. y Slezinger, I. I. (1966). *Wind Tunnels and their Instrumentation*. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1st ed.
- Gudmundsson, S. (2014). *General Aviation Aircraft Design: Applied Methods and Procedures*. Elsevier, Oxford, second ed.
- Hoffrenu, J. (2001). "Quest of an improved explanation of lift". *AIAA Aviation*, 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.
- Katz, J. y Plotkin, A. (2001). *Low Speed Aerodynamics*. Cambridge University Press, New York.
- Kaushik, M. (2019). *Theoretical and Experimental Aerodynamics*. Springer, Singapur.
- Morel, T. (1975). "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions". *Journal of Fluids Engineering*, 97(2):225–233.

- Munson, B., Young, D., Okiishi, T., y Huebsch, W. (2009). *Fundamentals of Fluids Mechanics*. Wiley, New Jersey, 6th ed.
- OACI (1993). *Manual de la Atmósfera Tipo de la OACI (Doc. 7488/3)*. Organización de Aviación Civil Internacional, 3ra ed.
- OACI (2006). *Aircraft Operations, Volume I: Flight Procedures (Doc. 8168)*. Organización de Aviación Civil Internacional, fifth ed.
- Orwen, A. E. y Pankhurst, R. (1977). *Measurement of Air Flow*. Pergamon Press, Norwich, 5th ed.
- Oñate, A. E. (2007). *Conocimientos del Avión*. Editorial Paraninfo, Madrid, 5ta ed.
- Prandtl, L. (1923). “Applications of modern hydrodynamics to aeronautics”. *National Advisory Committee for Aeronautics*, Tech. Rep. N° 116.
- Sadraey, M. (2013). *Aircraft Design: A Systems Engineering Approach*. John Wiley & Sons, Sussex, United Kingdom.
- Shapiro, A. (1953). *The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow*, volumen 1. The Ronald Press Company, New York.
- Shevell, R. (1983). *Fundamentals of Flight*. Prentice-Hall, New Jersey, 1st ed.
- Su, Y. (1991). “Flow Analysis and Design of Three-Dimensional Wind Tunnel Contractions”. *AIAA Journal*, 29(11):1912–1920.
- USAF (1960). *Aerodynamics Handbook for Performance Flight Testing*.
- Vincenti, W. (1986). “The Origin of Lift Revisited: II. Physical Processes of Airfoil-circulation Formation in Starting Flow”. *Technology and Culture*, 27(4):717–758.
- White, F. (2008). *Fluid Mechanics*. McGraw Hill, New York, 7th ed.
- Wu, J. Z., Zhu, J. Y., Zou, S. F., y Liu, L. Q. (2015). “The Origin of Lift Revisited: I. A Complete Physical Theory”. *AIAA Aviation*, 45th AIAA Fluid Dynamics Conference.
- Zhu, J. Y., Zou, S. F., Liu, L. Q., y Wu, J. Z. (2015). “The Origin of Lift Revisited: II. Physical Processes of Airfoil-circulation Formation in Starting Flow”. *AIAA Aviation*, 45th AIAA Fluid Dynamics Conference.

Índice alfabético

- actitud, 347
- aeróstato, 4
- ahusamiento, 250
- airspeed, 324
- ala, 297
- alabeo, 255
 - aerodinámico, 255
 - geométrico, 255
- alargamiento, 250
- alcance, 412
- altímetro, 43, 316
- altitud, 44
 - de transición (TRA), 319
 - indicada, 319
 - de densidad (DA), 45
 - de presión, 44
 - verdadera (TA), 44
- altura, 45
 - de presión, 46
 - indicada, 319
- amortiguamiento de pulsaciones, 167
- amortiguamiento de rolo, 352
- análisis dimensional, 100
- anemómetro, 324
- ángulo
 - de deslizamiento, 345
 - de planeo, 420
 - de trayectoria, 393
- ángulo de ataque, 200
 - de pérdida, 203
 - inducido, 258
 - de sustentación nula, 201
- ángulos
 - de actitud, 347
 - de Euler, 347, 400, 401
- área frontal equivalente, 134
- área parásita equivalente, 134
- aterrizaje, 431
- atmósfera estándar, 40
- atmósfera terrestre, 39
 - estratósfera, 40
 - exósfera, 40
 - mesósfera, 40
 - termósfera, 40
 - tropósfera, 40
- autonomía, 415
- balanza, 184
- baroaltímetro, 43
- borde de ataque, 194
- borde de fuga, 194
- cabeceo, 347, 348
- calibrated airspeed, 326
- cámara de trabajo, 175
- cámara de tranquilización, 173
- capa de transición, 320
- capa límite, 82
 - desarrollo, 83
 - espesor, 85, 86
 - laminar, 84
 - turbulenta, 86
- carreteo, 422
- centro aerodinámico, 209, 212
- centro de presión, 208, 212
- cero absoluto, 32
- circulación, 116, 455
- códigos Q, 317
- coeficiente aerodinámico, 106
 - de momento, 107, 206
 - de resistencia, 107, 204
 - de sustentación, 107
 - de sustentación de diseño, 205
 - de sustentación máximo, 201
- coeficiente de fricción, 85
- coeficiente de momento de charnela, 229
- coeficiente de presión, 112
- colector, 173
- combadura, 195
- condición de Kutta, 232
- condición de no deslizamiento, 72, 76

- condiciones de similitud, 109
- constante del aire, 35
- constante universal de los gases, 35
- consumo de combustible específico, 397
- control del avión, 349
 - direccional, 358
 - lateral, 350
 - longitudinal, 354
- Convenio de Chicago, 21
- convergente, 173
- coordinador de giro, 335
- cuerda, 194
 - aerodinámica media, 250
 - geométrica media, 250
 - media estándar, 250
- cuerpos
 - aerodinámicos, 117
 - romos, 117
- curva polar, 265
- decolaje, 422
- densidad, 31
- deriva, 301
- despegue, 422
- diagrama $V-n$, 443
- diedro, 249
- difusor, 177
- distancia de carreteo, 425
- divergencia de la resistencia, 131
- downwash, 258
- ecuación de altura, 36
- ecuación de Bernoulli, 57
- ecuación de continuidad, 55
- ecuación de estado, 34
- ecuación de Sutherland, 75
- ecuación hidrostática, 36
 - gradiente térmico constante, 38
 - temperatura constante, 37
- ecuaciones de movimiento, 391
 - características, 398
 - cinemáticas, 394
 - de seis grados de libertad, 399
 - dinámicas, 395
- efecto Magnus, 114
- efecto suelo, 436
- EFPA, 134
- elevación, 45
- empenaje, 299
- endurance, 415
- envergadura, 249
- envolvente de operación, 312
- EPA, 134
- equivalent airspeed, 327
- error de medición de presión, 141, 147
- escala de longitud, 109
- espesor (de un perfil), 195
- estabilidad, 363
 - direccional, 379
 - lateral, 381
 - longitudinal, 366
- estabilizador, 299
 - horizontal, 300
 - vertical, 301
- factor de carga, 439
 - límite, 443
 - último, 443
- factor de eficiencia de Oswald, 269
- fixed slot, 283
- flap, 276
 - de borde de ataque, 281
 - de borde de fuga, 278
 - Fowler, 281
 - plano de intradós, 279
 - ranurado, 281
 - simple de borde de fuga, 280
- flecha, 249
- fluidos newtonianos, 73
- flujo
 - bidimensional, 53
 - estacionario, 48
 - incompresible, 53, 55
 - no viscoso, 53
 - supersónico, 69
 - laminar, 79
 - turbulento, 79
- fórmula de Bréguet, 413, 414
- frenos aerodinámicos, 286
- fuerza lateral, 99
- fugoide, 378
- fuselaje, 293
 - monocasco, 295
 - reticular, 294
 - semimonocasco, 296
- generadores de vórtices, 285
- giro nivelado, 438
- giróscopo, 333
- grado de bloqueo, 183

grado de libertad, 391
 guiñada, 347, 348
 guiñada adversa, 363

 hipersustentador, 276
 hipótesis del continuo, 33
 homogeneidad dimensional, 102

 inclinómetro, 336
 indicador, 313
 de giro, 335
 de Mach, 331
 de rumbo, 337
 indicated airspeed, 325
 instrumental, 313
 clasificación, 313
 de vuelo, 313
 instrumentos del avión, 313

 KCAS, 327
 KEAS, 328
 KIAS, 326
 KTAS, 326

 línea media, 194
 línea sustentadora, 455
 líneas de
 corriente, 50
 flujo, 50
 trayectoria, 51
 traza, 51
 líquido manométrico, 159

 Mach indicado, 332
 mandos libres, 371
 manómetro, 157, 158
 de columna de líquido, 158
 de cuba, 163
 de lectura directa, 159
 de nivel constante, 159
 en U, 160
 margen estático, 370
 medición
 de presión estática, 61, 145
 de presión total, 61, 141
 método de variables repetitivas, 103
 micromanómetro, 164
 de nivel constante, 165
 de tubo inclinado, 164
 modo dinámico, 377, 384
 de balanceo holandés, 385
 de corto período, 377
 de espiral, 385
 de fugoide, 378
 de rolo, 384
 de *Dutch-roll*, 385
 momento aerodinámico, 99
 momento de cabeceo, 99
 de perfiles, 206
 momento de charnela, 228
 multimanómetro, 166

 nivel de transición (TRL), 319
 nivel de turbulencia, 81
 nivel de vuelo (FL), 319
 número de Knudsen, 34
 número de Mach, 54
 crítico, 222
 de divergencia, 224
 número de Reynolds, 77
 crítico, 79
 de transición, 79

 OACI, 21
 ornitóptero, 3
 Oswald, 269

 paradoja de d'alembert, 123
 pendiente de sustentación, 201
 pérdida de sustentación, 203
 perfil NACA, 233
 de 4 dígitos, 234
 de 5 dígitos, 237
 de 6 dígitos, 239
 performances estacionarias, 403
 polar de resistencia, 265
 posición del cg, 374
 potencia requerida, 408
 presión, 31
 absoluta, 157
 diferencial, 157
 estática, 60, 145
 total, 60, 141
 dinámica, 60
 pull-down, 441
 pull-up, 441
 punto neutro, 370

 QFE, 318
 QNE, 318
 QNH, 318

- range, 412
- relación de contracción, 174
- relación de planeo, 421
- resistencia, 98
- resistencia aerodinámica, 117
 - de forma, 118
 - de fricción, 120
 - de onda, 118
 - de perfiles, 204
 - de presión, 122
 - inducida, 262
 - parásita, 117, 118
- resultante aerodinámica, 98
- reversión de alerones, 363
- rolido, 347, 349
- rugosidad superficial, 121
- separación de la capa límite, 89
- similitud
 - cinemática, 109
 - dinámica, 109
 - geométrica, 109
- sistema de referencia
 - ejes aerodinámicos, 393
 - ejes cuerpo, 344
 - geográfico, 347
 - Tierra plana, 392
- slat, 284
- slotted flaps, 281
- sonda
 - aerodinámica, 152
 - de presión, 140
 - estática, 149
 - Pitot, 61, 141
 - Pitot-estática, 153
- split flap, 279
- spoilers, 286
- straightener, 173
- superficie alar, 249
- superficie móvil de control, 226, 227
- sustentación, 98, 111
 - de perfiles, 201
 - pérdida, 203
- techo absoluto, 419
- techo de servicio, 419
- temperatura, 32
- Teorema Pi, 102
- tiempo de trepada, 419
- toma estática, 145
- tracción requerida, 405
- transductor de presión, 168
 - eléctrico, 170
 - mecánico, 169
- trepada estacionaria, 417
- true airspeed, 325
- tubo de Bourdon, 169
- tubo de flujo, 55
- tubo Pitot, 61
- túnel de viento, 171
 - clasificación, 172
 - de circuito abierto, 178
 - grupo propulsor, 177
 - de circuito cerrado, 179
- variables de control, 399
- variables de estado, 399
- variómetro, 332
- velocidad, 33
 - ascensional, 417
 - calibrada, 326
 - de decisión, 424
 - de pérdida, 276
 - equivalente, 327
 - indicada, 325
 - inducida, 258
 - verdadera, 325
 - aleatoria, 81
 - instantánea, 80
 - media, 81
- ventanilla de Kollsman, 317
- viraje, 438
- viscosidad, 71
 - cinemática, 76
 - dinámica, 74
- volumen de cola
 - horizontal, 357, 367, 370
 - vertical, 361, 380
- volumen de control, 48
- vórtice, 455
- vuelo
 - acelerado, 437
 - en seis grados de libertad, 399
 - simétrico, 393
- vuelo estacionario, 403
 - planeado, 420
 - recto y nivelado, 404
 - sin potencia, 420
- washin, 255

washout, 255

winglet, 271

yawmeter, 156

La presente edición de
Fundamentos del vuelo del Avión
se terminó de imprimir en el mes de febrero de 2022
en Universitas Editorial.
Pasaje España 1467, B° Nueva Córdoba (5000), Córdoba,
Argentina.
Tel. +54 9 351 2587542
E-mail: contacto@universitaseditorial.com.ar

IMPRESO EN ARGENTINA
PRINTED IN ARGENTINA



Fundamentos del vuelo del Avión

Principios físicos y tecnológicos
de la operación aérea

Fundamentos del vuelo del avión es un libro que aborda los conceptos y principios básicos que rigen el vuelo de los aviones convencionales con un enfoque dirigido a estudiantes y profesionales de la ingeniería que se inician en el campo de la Aeronáutica o que necesitan reforzar sus conocimientos en el área. El libro se encuentra dividido en nueve capítulos que tratan los principales temas relacionados a la aviación, partiendo de los conceptos generales de la Física para avanzar luego con su aplicación al caso particular del vuelo del avión. Para ello, se incluyen más de 200 figuras y ejemplos ilustrativos que ayudan a comprender los contenidos. Además, se introducen diferentes fragmentos históricos que representan la evolución de la disciplina. Finalmente, en cada capítulo se dispone una guía de estudio compuesta por un cuestionario y una serie de problemas.

Acerca del autor: Gustavo J. Krause es Ingeniero Aeronáutico y Doctor en Ciencias de la Ingeniería egresado de la Universidad Nacional de Córdoba. Actualmente se desempeña como profesor de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de dicha universidad y es investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Desde su incorporación al Departamento Aeronáutica como docente de las cátedras de *Aeronáutica General* y *Seminarios de Aeronáutica y Aeropuertos*, el Dr. Krause ha trabajado en la actualización y ampliación del material de estudio, siendo el presente texto un resultado de ello.



Libro digital

ISBN 978-987-4029-66-9



9 789874 029669

Pasaje España 1467, Bº Nueva Córdoba (5000), Tel: +54 9 351 2587542, Córdoba, Argentina
Email: contacto@universitaseditorial.com.ar - www.universitaseditorial.com.ar

